

## СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГИБКИМИ СОРБЦИОННО-КАТАЛИТИЧЕСКИМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ

Т.Б. Чистякова, Ю.И. Шляго, И.В. Новожилова (СПбГИ (ТУ))

Представлена структура системы имитационного моделирования, позволяющая имитировать сложные физико-химические процессы получения новых видов сорбционно-каталитических материалов, проводить их комплексное исследование, а также решать задачу обучения операторов-технологов методам качественного и безаварийного ведения ТП производства сорбентов и катализаторов, используемых в системах жизнеобеспечения и защиты окружающей среды.

Ключевые слова: тренажеростроение, математическое и имитационное моделирование, численные методы, программные комплексы, гибкие многоассортиментные химико-технологические процессы, сорбенты, катализаторы.

Применение современной методологии имитационного моделирования при создании проблемно-ориентированных программных комплексов для проведения вычислительных экспериментов по исследованию сложных производственных процессов является сегодня одним из динамично развивающихся направлений химической промышленности. При оценке параметров технологических регламентов производств необходим их критический анализ с учетом применения современной методологии имитационного моделирования и использования последних достижений в области информационных технологий; необходимы достоверные и надежные математические модели химико-технологических процессов, среди которых наибольшее распространение получили физико-химические и эмпирические модели. Особенно важным является решение этих вопросов для производственных химико-технологических линий, имеющих сложную, гибкую, многостадийную производственную структуру, к которым, в частности, относится синтез сорбционно-каталитических матери-

алов, используемых в системах и устройствах жизнеобеспечения и защиты окружающей среды. Сложность исследования свойств различных типов сорбционно-каталитических материалов обусловлена строгими требованиями к качеству продукции, высокой стоимостью сырья, чувствительностью к возникновению брака на ключевых стадиях производства (гранулирования, сушки, прокаливания, пропитки), разнородностью и многообразием физико-химических процессов переработки сырья и материалов. Несмотря на большие успехи в теории и моделировании указанных ключевых процессов получения сорбционно-каталитических материалов, в этой области остается нерешенным целый ряд проблем, связанных с учетом сложных реологических характеристик материалов, а также интеграцией разработанных моделей в единую систему. Решение этих вопросов является исключительно важным с точки зрения улучшения качества продукции целевого назначения, сокращения материальных и энергетических затрат, возникающих вследствие субъективности принимаемых опе-

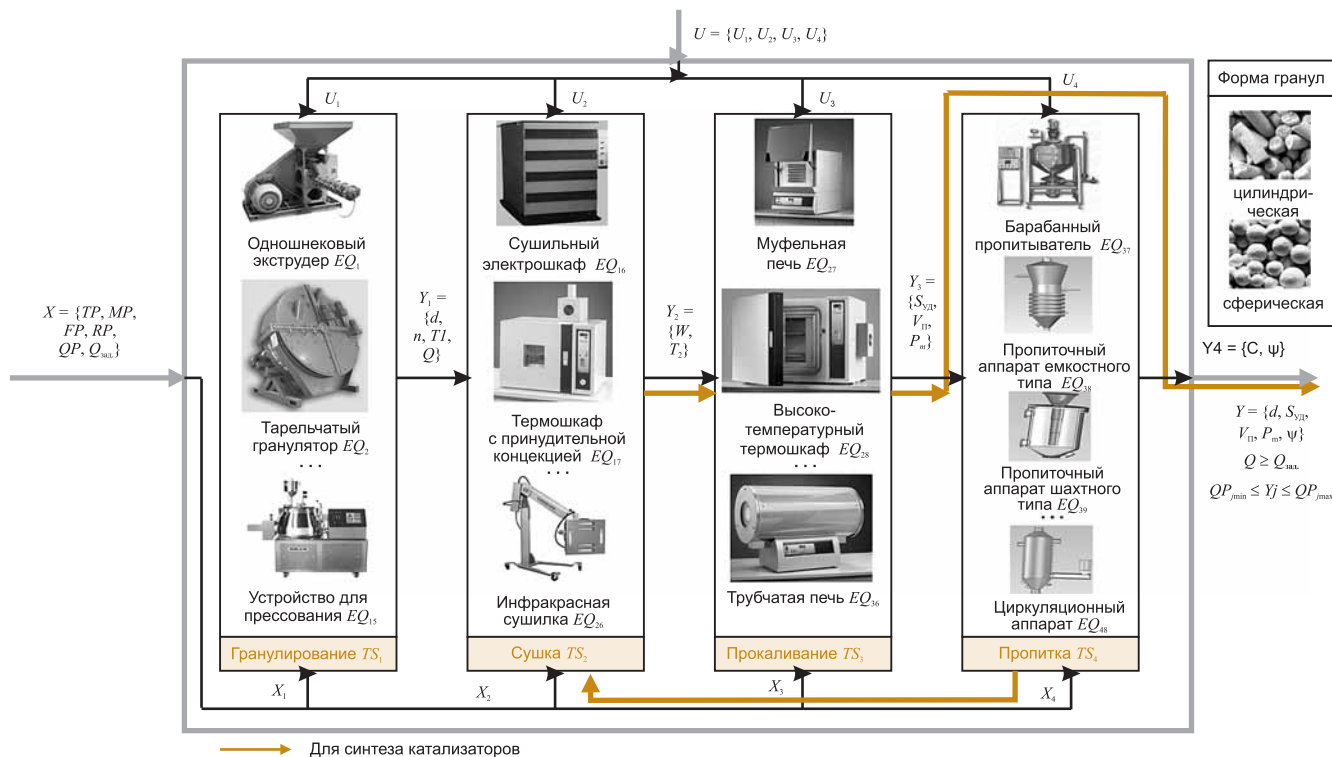


Рис. 1. Варианты формирования технологических линий производства

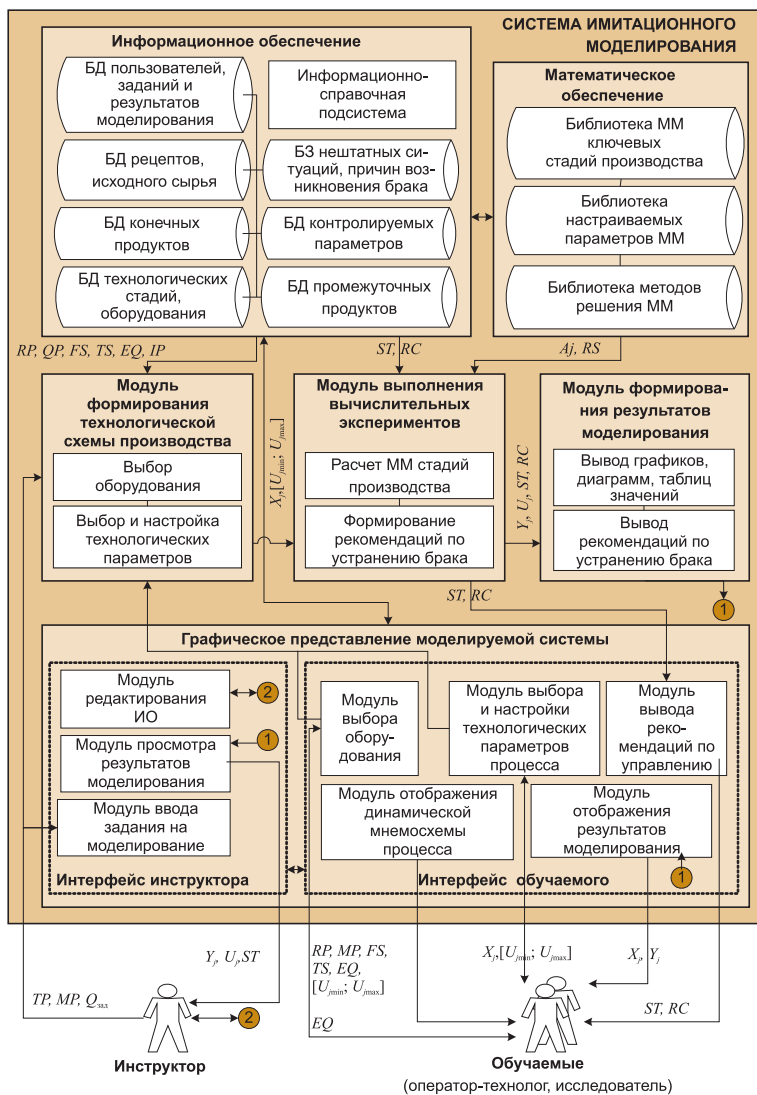


Рис. 2. Структура системы имитационного моделирования

ратора решений при отсутствии необходимой информации, повышения гибкости производства.

Для решения этой проблемы в условиях гибкого многоассортиментного производства разработана система имитационного моделирования, которая позволяет проводить исследования процессов получения сорбентов и катализаторов в различных режимах функционирования, прогнозировать показатели качества продукции, формировать последовательность технологических стадий производства для выпуска определенного вида продукции с заданными требованиями по качеству материалов. Процесс получения сорбционно-каталитических материалов как объект исследования и имитационного моделирования характеризуется: выпуском продукции различного типа  $TP = \{TP_1, \dots, TP_{tp}\}$ ,  $i = \overline{1, tp}$ ,  $tp = 3$  обширной номенклатуры  $MP = \{MP_1, \dots, MP_{mp}\}$ ,  $i = \overline{1, mp}$ ,  $mp = 13$ ; многообразием технологических стадий  $TS = \{TS_1, \dots, TS_{ts}\}$ ,  $i = \overline{1, ts}$ ,  $ts = 15$  оборудования  $EQ = \{EQ_1, \dots, EQ_{eq}\}$ ,  $i = \overline{1, eq}$ ,  $eq = 48$ ; возможностью получения одного и того же продукта из сырья разных видов  $FS = \{FS_1, \dots, FS_{fs}\}$ ,  $i = \overline{1, fs}$ ,  $fs = 7$  по различным рецептурам  $RP = \{RP_1, \dots, RP_{rp}\}$ ,

$i = \overline{1, rp}$ ,  $rp = 16$ ; строгими требованиями к качеству полупродуктов  $IP = \{IP_1, \dots, IP_{ip}\}$ ,  $i = \overline{1, ip}$ ,  $ip = 9$  и готовой продукции  $QP = \{QP_1, \dots, QP_{qp}\}$ ,  $i = \overline{1, qp}$ ,  $qp = 9$ ; возникновением на стадиях производства нештатных ситуаций  $\{ST_1, \dots, ST_{st}\}$ ,  $i = \overline{1, st}$ ,  $st = 55$ , связанных с нарушением показателей качества продукции.

Исследование процессов получения сорбентов и катализаторов позволило выделить особенности производства, такие как гибкость (возможность перестроения технологических линий) и многоассортиментность (широкая номенклатура, получение на одной технологической линии различных марок продукции), что ставит характерные задачи перенастройки производства, связанные с переходом на новый вид продукции, тип оборудования, производительность, значения показателей качества. Для имитационного моделирования процессов получения сорбентов и катализаторов важным является формирование химико-технологической схемы производства и определение диапазонов изменения управляющих воздействий каждого элемента схемы, обеспечивающих заданное качество продукции, как показано на рис. 1. Чтобы осуществить синтез химико-технологической мнемосхемы в зависимости от выбранного вида продукции необходимо учитывать множество факторов и атрибутов производства сорбентов и катализаторов, позволяющих имитировать ключевые физико-химические процессы.

Для решения задачи перенастройки и исследования гибкого многоассортиментного производства на основании формализованного описания составлены БД характеристик производства, включающие описание причин возникновения брака  $RS = \{RS_1, \dots, RS_{rs}\}$ ,  $i = \overline{1, rs}$ ,  $rs = 91$ , рекомендации по управлению процессом  $RC = \{RC_1, \dots, RC_{rc}\}$ ,  $i = \overline{1, rc}$ ,  $rc = 92$ , и предложена структура предметно-ориентированной системы имитационного моделирования процессов получения сорбентов и катализаторов (рис. 2).

При формировании функциональной структуры системы имитационного моделирования процессов получения сорбентов и катализаторов создается информационное обеспечение (ИО) [1], выполняющее функции исследования и обучения, включающие БД характеристик производства и базы знаний (БЗ) нештатных ситуаций, математическое обеспечение, модули формирования технологической схемы производства, выполнения вычислительных экспериментов, формирования результатов моделирования, интерфейс инструктора и обучаемого (исследователя).

Ядром системы имитационного моделирования является библиотека математических моделей (ММ)

ключевых стадий [2]. Обобщенное описание базовых ММ представлено в виде совокупности векторов  $Y_j = f(X_j, U_j, A_j, t)$ , где  $Y_j$  – вектор выходных параметров ( $d$  – диаметр гранул, м;  $S_{уд}$  – удельная поверхность, м<sup>2</sup>/кг;  $V_{п}$  – суммарный объем пор, м<sup>3</sup>/кг;  $P_m$  – механическая прочность, Па;  $\psi$  – равномерность распределения раствора по грануле носителя),  $X_j$  – вектор входных параметров,  $U_j$  – вектор управляющих воздействий,  $A_j$  – вектор параметров ММ;  $t$  – время;  $j$  – индекс принадлежности к стадии производства (рис. 3).

Библиотека ММ ключевых стадий производства является настраиваемой на различные виды выпускаемой продукции и производительность, а также адаптивной к аппаратурному оформлению химико-технологического процесса и характеристикам сырья. Библиотека ММ ключевых стадий производства включает ММ стадии гранулирования, термических стадий сушки и прокаливания, пропитки, оказывающих наибольшее влияние на показатели качества готовой продукции. ММ описывают функционирование объекта исследования в допустимом по регламенту режиме. Адекватность ММ ключевых стадий проверена для различных типов алюмооксидных сорбционно-каталитических материалов: алюмофосфатного сорбента АФ, алюмохромфосфатного катализатора АХФ, носителя шарикового активного оксида алюминия ШАОА. Адекватность ММ подтверждена выполнением условия адекватности по критерию Фишера. Использование ММ позволяет существенно повысить эффективность исследовательских работ за счет снижения затрат на проведение экспериментов, а также позволяет прогнозировать технологические параметры и оценивать показатели качества процесса на каждой стадии производства, что повышает эффективность управления как каждой стадией в отдельности, так и процессом синтеза в целом.

На рис. 4 представлены результаты моделирования ключевых процессов производства сорбентов и катализаторов – гранулирования, сушки, прокаливания, пропитки соответственно.

Для моделирования процессов получения сорбентов и катализаторов в нештатных ситуациях [3], связанных с возникновением брака продукции, разработана библиотека параметров базовых ММ, настраиваемых на различный вид продукции, а также параметров, моделирующих нештатные ситуации. Нештатные ситуации разделены на следующие типы: нарушение размеров и формы гранул, несоответствие гранул требованиям к фазовым (кристаллохимическим) и структурно-прочностным характеристикам, нарушение требований к показателям качества, контролируемых визуально. Моделирование причин нештатных ситуаций осуществляется изменением параметров базовой модели: управляющих воздействий  $U_j$ ; входных параметров объекта  $X_j$ ;

*Прогресс науки и машин - это полезное средство, но единственной целью цивилизации является развитие человека.*

Эннио Флайано

коэффициентов функциональной модели  $A_j$  по отношению к номинальным значениям, хранящимся в библиотеке параметров ММ.

Включенный в состав системы модуль выполнения вычислительных экспериментов необходим для успешного проведения научно-исследовательских работ, направленных на разработку новых методик получения современных сорбционно-каталитических материалов.

Графическое представление моделируемой системы использует два интерфейса: инструктора и обучаемого (исследователя). Таким образом, система имитационного моделирования позволяет проводить обучение операторов-технологов управлению производством сорбционно-каталитических материалов при возникновении брака продукции. В данном случае инструктором задаются следующие компоненты системы и их параметры: данные об обучаемом; последовательность базовых моделей ключевых стадий производства; тип и последовательность нештатных ситуаций (например, гранулы после сушки имеют влажность выше заданной регламентом, несоответствие прокаленных гранул требованиям регламента к фазовым и структурно-прочностным характеристикам, неравномерность пропитки гранул по диаметру и др.); причины нештатной ситуации (гранулы, поступающие на сушку с операции провялки, имеют влажность выше допустимой регламентом, несоответствие состава и расхода продувочного газа при прокаливании, недостаточная продолжительность пропитки и др.); настраиваемые параметры ММ; время (момент системного времени) возникновения нештатной ситуации; время обучения. Вся информация о компонентах и параметрах сценария обучения заносится в файл сценария, на основании которого реализуется сформированный сценарий для обучаемого, при этом сценарий обучения может содержать несколько задач различного типа, которые будут последовательно реализовываться в соответствии с их временем моделирования. При выходе контролируемых параметров за допустимые регламентом пределы, выдается сообще-

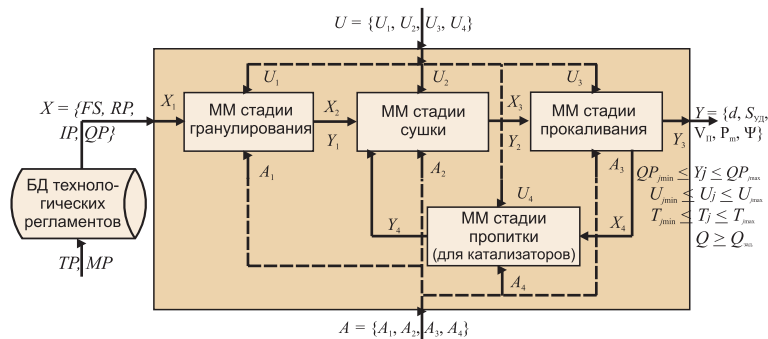


Рис. 3. Схема взаимосвязи параметров ММ ключевых стадий

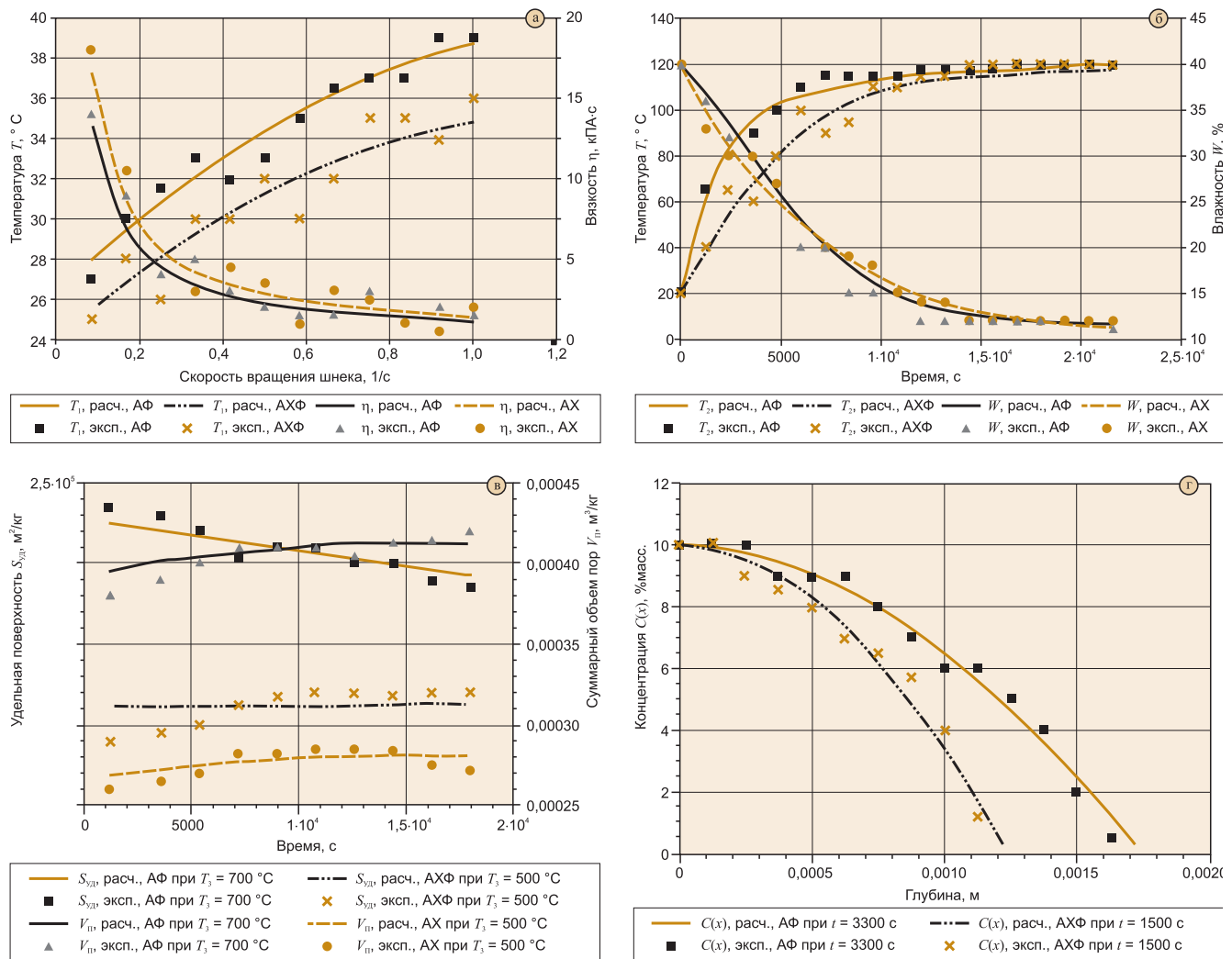


Рис. 4. Результаты моделирования ключевых процессов производства, где а) гранулирование; б) сушка; в) прокаливание; г) пропитка

ние о возникновении нештатной ситуации, включающее соответствующие рекомендации по управлению процессом. Обучаемый путем изменения управляющих воздействий переводит объект изучения в безопасные пороговые ограничения параметров. После окончания времени обучения формируется протокол, содержащий информацию об обучаемом, о задании на обучение, действиях по устранению нештатной ситуации, значениях выходных характеристик ТП в виде таблиц, двумерных и трехмерных графических зависимостей.

Предложенная структура системы имитационного моделирования отвечает требованиям по гибкости для управления различными классами процессов в условиях многоассортиментного производства; адаптивности по отношению к номенклатуре продукции и производительности; управлению на базе библиотеки ММ; визуальному отображению мнемосхемы ТП; модульной архитектуре.

Таким образом, система имитационного моделирования позволяет решать задачи:

1) *синтеза технологической линии производства (перенастройки производства на новый вид продукции):*

для выпуска определенного типа  $TP$  и марки  $MP$  продукции, заданной составом сырья  $FS$ , рецептурой  $RP$ , требованиями к качеству  $QP$  и техническим характеристикам  $SP$ , сформировать последовательность технологических стадий  $TS$ , на основе ММ определить диапазоны технологических режимов  $[U_{j\min}; U_{j\max}]$  каждого из элементов технологической схемы  $EQ$  для достижения производительности  $Q \geq Q_{\text{зад}}$  ( $Q_{\text{зад}}$  – заданная производительность) при соблюдении ограничений по качеству материалов  $QP_{j\min} \leq Y_j \leq QP_{j\max}$ .

2) *исследования качества продукции на стадиях производства:* на основании сформированной технологической линии  $TL$  определить наилучшие управляющие воздействия на каждой стадии производства  $U_j \in [U_{j\min}; U_{j\max}]$  при температуре  $T_{j\min} \leq T \leq T_{j\max}$ , обеспечивающие заданные показатели качества полупродуктов  $IP$ ,  $IP_{j\min} \leq Y \leq IP_{j\max}$  и готовой продукции  $QP$ ,  $QP_{j\min} \leq Y_j \leq QP_{j\max}$ .

3) *исследования процессов получения сорбентов и катализаторов при возникновении брака:* в случае возникновения брака  $ST$  определить наиболее вероятную причину его возникновения  $RS$ , выдать рекомен-

дации по управлению процессом  $RC$  и направление изменения управляющих воздействий  $U_j \in [U_{j\min}; U_{j\max}]$  для устранения брака.

Проанализировав полученные результаты по апробации разработанной методологии имитационного моделирования сорбционно-каталитических процессов в ООО "Центр трансферта сорбционно-каталитических технологий" и ООО "Научно-производственная фирма "Катализаторы, сорбенты, носители – технологии" (Санкт-Петербург) и внедрению системы имитационного моделирования в ФГУП "НКТБ "Кристалл" (Санкт-Петербург), можно сделать вывод о применимости результатов для поддержки технологий производства новых видов сорбционно-каталитических материалов, используемых в системах и устройствах жизнеобеспечения, защиты окружающей среды.

*Чистякова Тамара Балабековна* – д-р техн. наук, проф., проректор по учебной работе, зав. кафедрой, *Новожилова Инна Васильевна* – канд. техн. наук, зав. учебной лабораторией, старший преподаватель кафедры систем автоматизированного проектирования и управления Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), *Шляго Юрий Иванович* – канд. техн. наук, зам. директора-главного конструктора ФГУП "НКТБ "КРИСТАЛЛ", вед. научн. сотр. кафедры систем автоматизированного проектирования и управления СПбГТИ (ТУ).

Контактный телефон (812) 494-93-70, факс (812) 316-18-26. E-mail: [sapr@ws01.sapr.pu.ru](mailto:sapr@ws01.sapr.pu.ru)

## СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРУДЕРАМИ В ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Т.Б. Чистякова, А.Н. Полосин (СПбГТИ (ТУ))

Представлена проблемно-ориентированная система имитационного моделирования, ядром которой является библиотека динамических моделей типовых секций шнеков экструдеров различных классов, применяемых в перенастраиваемых производствах полимерных материалов. Система позволяет синтезировать модели, имитирующие гидродинамические процессы в аппаратно гибких экструдерах и предназначенные для расчета времени пребывания и показателей качества экструдата, исследования процесса экструзии в разных режимах функционирования и управления качеством полимерных материалов, используемых в пищевой и медицинской промышленности.

Ключевые слова: имитационное моделирование, типовые гидродинамические модели, время пребывания, численные методы, программные комплексы, экструзия, полимерные материалы.

### Введение

Полимерные материалы, изготавливаемые высокопроизводительным непрерывным способом на экструзионных и экструзионно-каландровых линиях, находят широкое применение в различных отраслях промышленности, например, пленки используются для упаковки фармацевтических препаратов, пищевых продуктов и косметических средств, пеноплиты в качестве тепло-, звуко- и гидроизоляционных материалов на объектах строительства. Поэтому к их качеству предъявляются высокие требования, основными из которых являются: отсутствие термических дефектов (дырок, черных точек, деструкционных полос), вызванных перегревом и разложением полимерного материала, и твердых включений, образующихся вследствие неполной пластикация материала, а также равномерность распределения свойств по объему материала (например, однородность цветовой окраски). Выполнение этих требований в условиях

гибкого многостадийного производства, характеризующегося частыми переходами на новые типы полимерных материалов и производительность в соответствии с требованиями рынка и, как следствие, изменением аппаратного оформления стадий и режима функционирования, возможно только за счет разработки и внедрения компьютерных систем управления качеством материалов на всех стадиях производства.

Ключевой стадией производства полимерных материалов является процесс экструзии, предназначенный как для смешения и пластикация материала при подготовке питания каландра (в экструзионно-каландровых производствах плоских пленок и листов), так и для изготовления целевой продукции (в экструзионных производствах плоских и рукавных пленок и пеноплит). Стадия экструзии характеризуется множеством вариантов аппаратного оформления, что обусловлено использованием экструдеров различных классов (одношнековых, осциллирующих, двухшне-